

## Kárpát–Pannon régió gravitációs képe — geodinamikai vonatkozások

### *Gravity picture of Carpathian–Pannonian Region — geodynamical references*

KISS JÁNOS

(kiss.janos@mfgi.hu)



Tárgyszavak: Kárpát–Pannon régió, Bouguer-anomália, spektrálanalízis, gravitációs lineamens, izosztázia, köpenyáramlás, geodinamika

#### Kivonat

Ebben a tanulmányban a Kárpát–Pannon régiót lefedő gravitációs Bouguer-anomália térkép sajátos jellegzetességeinek eredetére keressük a magyarázatot, azaz arra, hogy mely földtani hatások és folyamatok hozhatták létre a gravitációs anomáliateret. A litoszféra vízszintes és függőleges irányú mozgása a kőzetek sűrűségváltozása alapján is nyomozható. A Bouguer-anomália térkép sokoldalú elemzése lehetővé teszi a földtani értelmezést, de az értelmezés során a földtudományok különböző részterületein megszületett eredmények ismerete és figyelembe vétele feltétlenül szükséges. Így a munka során felhasználtuk a Kárpát–Pannon régió kialakulásáról szóló, korábbi tanulmányokat (pl. BALLA 1982, 1984; HORVÁTH 2004, 2007; VÖLGYESI 2010; KOVÁCS et al. 2011, vagy TARI 2012) és azokat a gravitációs adatfeldolgozásokat és közzétett tanulmányokat, amelyek a mélyföldtani jelenségek értelmezésével foglalkoztak (pl. SZABÓ, PÁNCICS 1999a, b; MÉSZÁROS, ZILAH-SEBESS 2001; KISS 2006; 2009a, b, 2010, 2012, 2013a, b). A Kárpát–Pannon régió gravitációs adatainak ilyenfajta értelmezése — a korábbi feldolgozások és tanulmányok összegzéseként — a térség egy lehetséges geodinamikai modelljét eredményezte.

Csak az országos gravitációs mérési adatok alapján a Pannon-medence speciális helyzete nem ismerhető fel, bizonyos hatások az ország méretéből, és földrajzi helyzetéből adódóan nem is vizsgálhatók. Kitekintve a Pannon-medencéből, gravitációs szempontból egy új világ tárul elénk. A régiót lefedő digitális adatrendszer új és egységes feldolgozási és értelmezési lehetőségeket biztosít.

A laterális, felszínközeli sűrűség határfelületek digitális adatfeldolgozással kijelölhetőek (pl. SZABÓ, PÁNCICS 1999b, KISS 2006). Az adatok elemzése, a felszínközeli hatások vizsgálata után a nyilvánvalóan jelen lévő regionális anomáliák azonosításával folytatódott. Megfelelő méretű területet vizsgálva már a nagyobb mélységek, a kéreg, illetve a felső-köpeny (azaz litoszféra) eredetű sűrűségváltozások is nyomon követhetők a gravitációs mérési adatok alapján. A hegyek izosztatikus gyökérzónáinak és a medenceterületek köpeny-felboltozódásainak korábban felismert gravitációs hatása (KISS 2009b, 2010) több esetben tisztázta a magyarországi Bouguer-anomália térkép sajátos, felszíni földtani ismereteink alapján ellentmondásosnak tűnő menetét.

Az adatok további elemzése, a gravitációs anomália térkép mélységi szeletelése (KISS 2012) megmutatta, hogy a Bouguer-anomália térképen kéreg–köpeny eredetű hatások is vannak (pl. a Moho-szint felszínének változása). A gravitáció a nagy mélységek sűrűségeloszlásáról is területi képet ad, ami kéregkutatási szempontból fontos. A Moho-szint mélységét a kéreg vastagsága határozza meg. Az izosztatikus mozgások vastagítják (root) vagy vékonyítják (antiroot) a földkérget. A változó kéregvastagság a köpenyáramlások egyfajta úttorlaszaként jelentkezik, eltereli azokat, így az izosztatikus eredetű változások geodinamikai tényezőkké válhatnak (KISS 2013a). Az orogén hegységképződést lassan követő izosztatikus mozgásokkal és az ezekből származó kéregdeformációkkal az alpi, illetve kárpáti vonulat kialakulásának időrendisége egyszerűen magyarázhatóvá válik.

A KOVÁCS et al. (2011) által, köpenyzárványok és szeizmikus anizotrópia-vizsgálatok alapján feltételezett köpenyáramlási modellt fejlesztettük tovább, mely nyírási zónákat jelölve ki a gravitációs adatok alapján, amelyek egyben a köpenyáramlási irányokat is mutatják. A feldolgozások és elemzések eredményeként a régió kialakulásának egy lehetséges módja rajzolódik ki az értelmezésekből, ami a feszültségvizsgálatok, paleomágneses mérések, radiometrikus kormeghatározások és a szerteágazó földtani kutatások eredményeivel is jó összhangban van.

Keywords: Carpathian–Pannonian Region, Bouguer anomaly, Spectral analysis, gravity lineaments, isostasy, mantle flow, geodynamics

### Abstract

In this study we are looking for the reasons (geological constructions and processes) of special signatures of Bouguer anomaly map of Carpathian-Pannonian Region. The effect of horizontal and vertical motions of the lithosphere blocks appears on the Bouguer anomaly map because of the density changes of the rocks.

The geological interpretation can be down by multi-faceted analysis of the Bouguer anomaly map, but to do this, the knowledge of the results of different subfields of geosciences are necessary. So we have used the previous studies about the development of Carpathian-Pannonian Region (for example BALLA 1982, 1984; HORVÁTH 2004, 2007; VÖLGYESI 2010; KOVÁCS et al. 2011, or TARI 2012) and those gravity data processing and rock physics studies, which were used for the interpretation of deep geological construction (for example SZABÓ, PÁNCICS 1999a, b, MÉSZÁROS, ZILAHÍ-SEBESS 2001; KISS 2006, 2009a, b, 2010, 2012, 2013a, b).

Such interpretation of Carpathian-Pannonian Bouguer anomaly data — as a summary of previous data processing and studies — resulted a special geodynamical model for the region.

The special position of the Pannonian Basin and some regional (deep) gravity sources cannot be accurately enough determined if it is based only on the national gravity data, because of the size of the country. Looking out from the Pannonian Basin we have seen a new world in point of view gravity. Using gravity data set of the Carpathian–Pannonian Region we have new possibilities in data processing and geological interpretation of gravity data.

The lateral near surface changes of rock densities can be determined by digital data processing (for example SZABÓ, PÁNCICS 1999b, KISS 2006). After the examination of near surface effects we have studied the regional gravity anomalies connected to isostasy (KISS 2009b, 2010). Gravity effects of isostatic roots below the mountains and antiroots below the deep sedimentary basins make clear some paradox manner of the Hungarian Bouguer anomaly field. The study of the gravity data and depth slicing of Bouguer anomaly map (KISS 2012) showed the crust or mantle origin impacts of the gravity anomaly field (such as undulation of the Moho discontinuity). So the gravity data processing can give spatial information about the deep seated density inhomogeneities for the lithosphere investigations.

The depth of the Moho is determined by thickness of the crust. The isostatic movements can increase (by roots) or decrease (by antiroots) the Earth crust. The changeable thickness of the crust appears as a barrier in the pathway of the mantle flow, which has change the direction of the driving force and isostatic origin changes may turn into geodynamic factors (KISS 2013a).

By the slow isostatic motions follower the formation of orogenic mountain range and the crust deformations originating from these, the chronology of the development of the Alpine-Carpathian mountain range turns to be explained simply.

KOVÁCS et al. (2011) have already supposed a mantle-flow model for the Pannonian Basin based on the studies of deep mantle xenoliths and seismic anisotropy. By the investigation of the Bouguer anomaly field we propose a slightly more detailed geodynamic model of the Carpathian-Pannonian Region. A possible manner of the region's development is outlined from the analysis and interpretations, which is in good harmony with the stress examinations, with the results of paleomagnetic measurements, radiometric dating and complex geological researches.

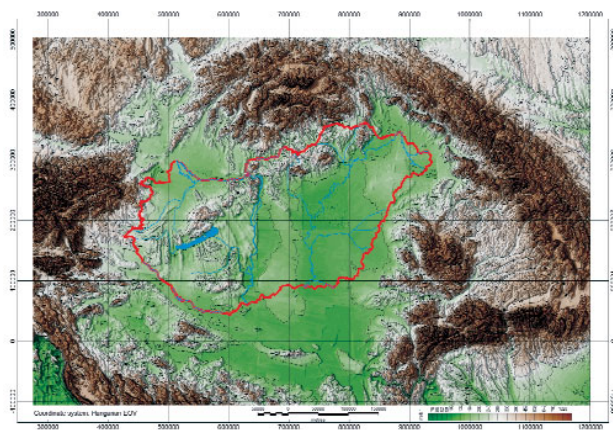
## Bevezetés, kiindulási adatok

A Kárpát–Pannon régió digitális adatrendszerei (pl. domborzati [1. ábra], illetve gravitációs adatai [2. ábra]) rendelkezésünkre állnak, ami lehetővé teszi számunkra a régió gravitációs adatainak elemző vizsgálatát — többek közt kéregszerkezeti és geodinamikai szempontból.

A környező hegyek (Alpok–Kárpátok–Dinaridák) vonulatai a domborzati térképen szinte minden oldalról körülveszik a Pannon-medencét, ami még az úrből is jól azonosítható morfológiai formát eredményez. Így a hegyek gerincvonala számunkra egy vonatkoztatási rendszert jelent, ami a további vizsgálatok során a térképi tájékozódást segíti. A Kárpát–Pannon régió Bouguer-anomália térképét megjelenítve, megállapíthatjuk, hogy a domborzat és a gravitációs anomáliátér között egyértelmű kapcsolat van, negatív korreláció.

A Nettleton-eljárás<sup>1</sup> szempontjából ez hibának tűnhet, de valójában itt nem a Bouguer-érték kiszámításakor alkalmazott rossz domborzati korrekcióról van szó, hanem a nagy hegyek (mély medencék) izosztikus hatását látjuk, tehát egy olyan regionális gravitációs hatást, ami a Moho-szintjén jelentkezik.

<sup>1</sup>A Nettleton-eljárás megmutatja, hogy a Bouguer-anomália érték kiszámítása során melyik a jó korrekciós sűrűségérték, aminek alkalmazásakor a kapott Bouguer-anomália térkép semmilyen korrelációt nem mutat a domborzattal.

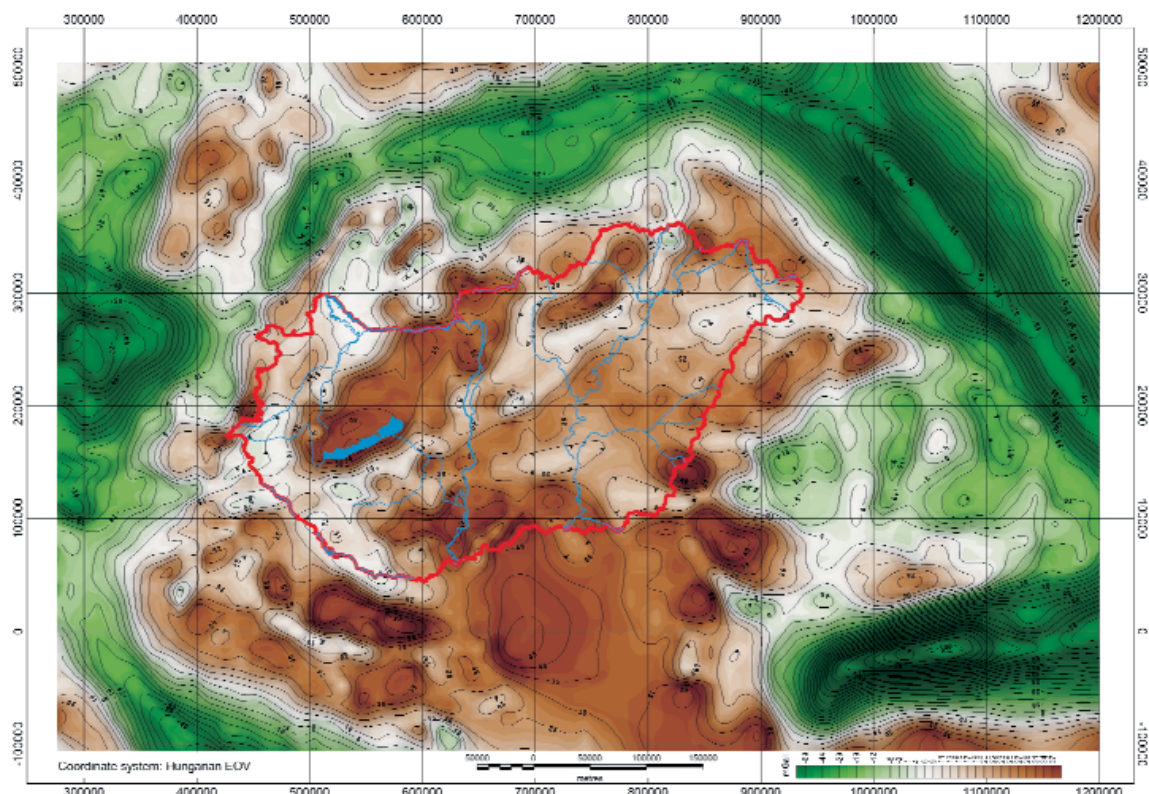


1. ábra. Kárpát–Pannon régió domborzata (SRTM)

Figure 1. Relief map of Carpathian–Pannonian Region (SRTM)

## Regionális izosztikus hatások a gravitációs térképen

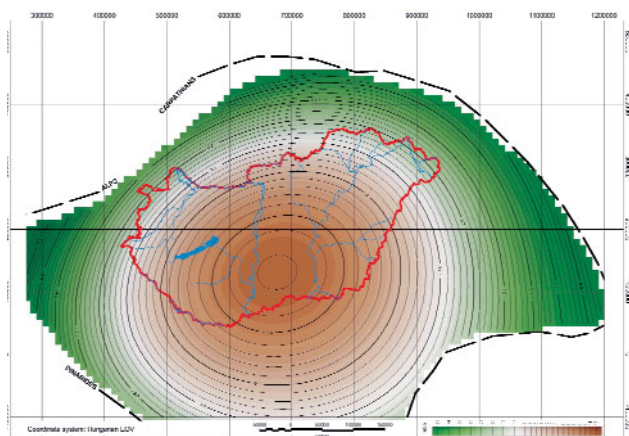
A domborzat és a Bouguer-anomália negatív korrelációja izosztikus hatásokat jelez — izosztikus gyökérzónát a hegyek alatt, és köpeny-kiemelkedést a mély medencéknel. Ez tulajdonképpen a felszíntől számított második sűrűség vezérszintnek, a Moho-szintnek a hullámzását jelenti — az első vezérszint a medencealjzat).



2. ábra. Kárpát-Pannon régió Bouguer-anomália térképe

Figure 2. Bouguer anomaly map of Carpathian-Pannonian Region

A hegyek gerincvonalán belül, azaz a Pannon-medence területén a gravitációs anomáliát harmadfokú felület-approximáció segítségével<sup>2</sup>, egyetlen maximummal leírható (3. ábra). Azaz a Pannon-medence a középhegységi vonulattal és az alföldekkel együtt, regionális értelemben (a második sűrűség vezérszint alapján) egyetlen nagy maximummal jellemezhető.



3. ábra. A gravitációs anomáliát harmadfokú felület-approximációja a Pannon-medencében

Figure 3. 3<sup>rd</sup> order polynomial approximation of the regional gravity anomaly field in the Pannonian Basin

<sup>2</sup>A fő égtájak irányában, szelvények mentén végzett elemzések alapján a harmadfokú illesztés tűnt a legelfogadhatóbbnak (Kiss 2009b).

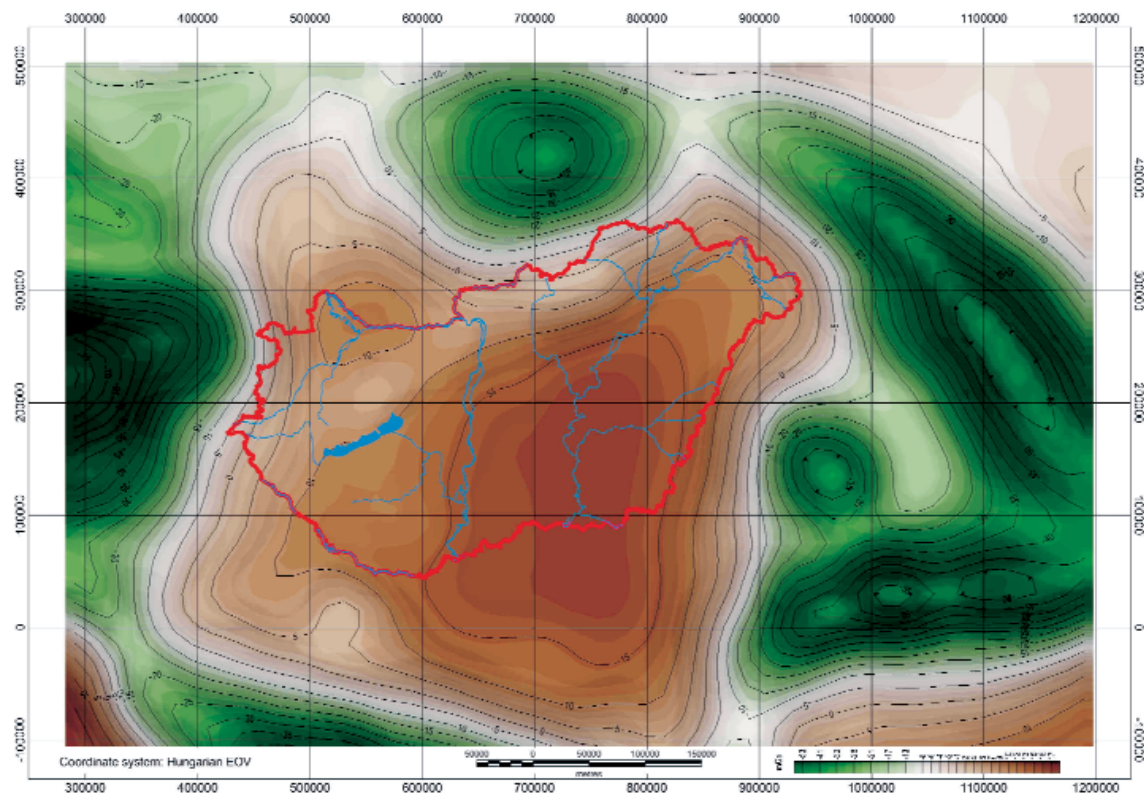
É–D-i és Ny–K-i szelvények nyomvonala mentén vizsgálva az adatrendszer (Kiss 2009b), jól láthatók a hegységek körzetében kialakuló gravitációs minimumok és a Pannon-medence belső részein jelentkező maximum (Kiss 2013b). A harmadfokú polinommal való közelítés a szelvények mentén is jó görbeilleszkedést ad. A szelvények szinte minden irányból hasonló képet mutatnak, ami gravitációs szempontból azt jelenti, hogy az izosztázia következménye miatt egy erős regionális hatással kell számolni a Bouguer-anomália esetében — a témával két korábbi cikkben is foglalkoztunk (Kiss 2009b, 2010).

A digitális domborzati adatok (az Alpok, Kárpátok, Dinaridák vonulata) felhasználásával, az AIRY-HEISKANEN<sup>3</sup> lokális izosztatikus modell alapján, az izosztatikus hatások az egész régióra kiszámíthatóak (4. ábra).

A hegyek izosztatikus gyökérzónájának gravitációs hatása a Bouguer-anomália térkép nagy minimumzónáinak megfelelő, ami jelzi, hogy a térkép egyik legjelentősebb regionális anomália rajzolatát a hegyek izosztatikus gyökérzónája adja. A hegyek gerincvonalai és a gravitációs minimumtengelyek eltérését tapasztalhatjuk az izosztatikus hatás és a domborzat összevetése során, ez gyors kéreg- vagy köpenymozgásra utalhat (Kovács et al. 2011).

<sup>3</sup>AIRY (1855) azt feltételezte, hogy a tengerszint feletti domborzat egyfajta tükörképeként, egy mély gyökérzónája is van a hegyeknek. A domborzat és a gyökérzóna azonos gravitációs hatásának köszönhető az izosztatikus egyensúly (mint pl. az úszó test egyensúlya). AIRY lokális izosztatikus modelljének gyakorlati alkalmazását HEISKANEN (pl. 1959) vezette be széles körben, ezért az AIRY-HEISKANEN elnevezés.





**4. ábra.** Az izosztikus gyökérzónák gravitációs hatása a Kárpát-Pannon régióban (az AIRY-HEISKANEN izosztikus modell alapján)

*Figure 4.* Isostatic root effect of Carpathian-Pannonian Region (based on AIRY-HEISKANEN local isostatic model)

Felmerül a kérdés, hogy talán a VENING MEINESZ (1948) féle regionális izosztikus modellt kellene alkalmazni? E szerint a regionális izosztikus modell szerint, a földkéreg a behajlásával rugalmasan veszi fel a magas hegységek által okozott terhelést, ami az AIRY-HEISKANEN izosztikus modellnél sokkal szélesebben jelentkező, de kisebb mélységű izosztikus gyökérzónát eredményez.

A modellezési eredményeink azt mutatják, hogy az Alpok-Kárpátok esetében az AIRY-HEISKANEN kompenzáció (4. ábra) áll közelebb a valósághoz. A ható 25–30 km mélysége (Moho-szint) miatt az izosztikus gyökérzónák számított gravitációs hatása az AIRY-HEISKANEN modell szerint (direkt feladat modellezett eredménye alapján) megfelel a Bouguer-anomálián (2. ábra) megjelenő vizuálisan azonosítható regionális hatásnak, sőt még talán szélesebb is annál.

Regionális hatások kimutatására a gravitációs adatfeldolgozásban többféle eljárást ismert:

- Analitikus folytatások: a mérési szint virtuális fel-emelése az analitikus felfelé folytatás segítségével egy magasabb szintre, ami a felszínközeli hatásokat gyengíti, s így a regionális, mélybeli hatásokat felerősíti;

- Tértartománybeli szűrések: simító (pl. átlagoló) szűrővel a mély, regionális hatásokat erősítjük fel, elnyomva a felszínközeli lokális hatásokat;

- Frekvenciatartománybeli szűrések: a felszínközeli hatók nagyfrekvenciás, rövid hullámhosszúságú jeleinek kiszűrésével — „lowpass” szűrővel.

Mindegyik eljárásban azt az általános geofizikai alapelvet használjuk fel, hogy minél mélyebb a ható (minél messzebb van az érzékelőtől), annál nagyobb hullámhosszúságú anomáliát ad. A regionális hatások szeparálása után, a kapott szűrt térképeknél eddig komoly gondot jelentett a hatás mélységének azonosítása (meghatározása).

### **Spektrálanalízis, spektrális szűrések**

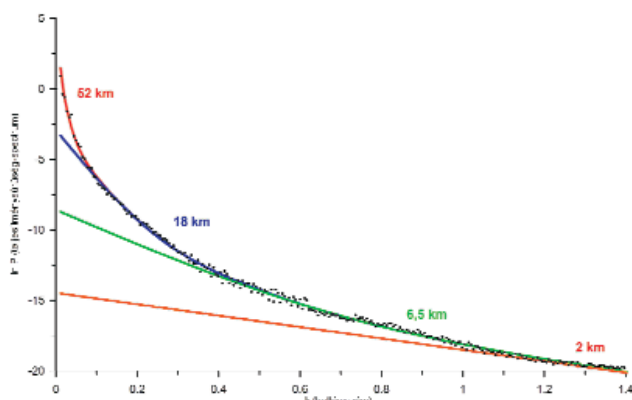
A gravitációs adatfeldolgozásban, a mélység meghatározására ma már van megoldás:

- Spektrálanalízis — az anomáliák teljesítménysűrűség-spektruma alapján a legjellemzőbb mélységtartományok azonosítása, az adott mélységtartomány leválasztása sáv-szűréssel;

- Spektrális mélységbecslés — a teljesítménysűrűség-spektrumból ekvivalens modellek alapján végzett mélység-meghatározás (a sáv-szűréssel kapott térképek hatóinak mélységbecslése).

A teljesítménysűrűség-spektrum megmutatja, hogy az anomália térkép milyen hullámhosszúságú (térfrekvenciájú) jelekből áll. A spektrum egyes szakaszai különböző mélységű hatások jeleit írják le.

A spektrálanalízis során kiszámítjuk a teljesítménysűrűség-spektrumot, kiválasztjuk a legegértelműbben jelentkező spektrumszakaszokat, ekvivalens hatók segítségével meghatározzuk azok mélységét (5. ábra), majd az



5. ábra. A Kárpát-Pannon régió Bouguer-anomália térképének teljesítménysűrűség-spektruma a spektrális mélységekkel

Figure 5. Power density spectrum of Bouguer anomaly map of Carpathian-Pannonian Region with the estimated depth

ezekhez a mélységekhez tartozó anomáliákat leválogatjuk az eredeti térképből. Az eljárás, a spektrális mélységbecslés nem ad pontos mélységeket és pontos koordinátákat, de megadja a domináns mélységtartományokat, amelyeket a földtani ismereteink alapján be tudunk azonosítani.

Ilyen módon a gravitációs adatok alapján kéreg-, illetve litoszférakutatás szempontjából fontos területi képet kapunk a pont- (pl. magnetotellurika) és vonalszerű (pl. szeizmika) mérési eredmények mellé.

A spektrális analízis eredményeképpen négy mélységet lehetett meghatározni (1. táblázat).

1. táblázat. A spektrális mélységek lehetséges földtani magyarázata

Table 1. Geological explanation of depths of gravity sources

No.	Az ekvivalens ható mélysége	A gravitációs hatás forrása	A megjelenés jellemző helye, érvényessége
1	~52 km	Moho-szint, kéreg-köpeny határfelület	Alpok, Kárpátok, Dinaridák
2	~18 km	Conrad szint, gránitos-bazaltos kéreg határfelülete	Pannon-medence
3	~6,5 km	A legmélyebb üledékes medence mélysége	Pannon-medence
4	~2 km	A laza, nem tömörödött üledékek kimutathatósági határa	Pannon-medence

A szeizmikus mérések alapján a Pannon-medencében 25–30 km, a környező hegykoszorú alatt 40–60 km-es Moho-szint mélység a jellemző, így az 52 km-es spektrális mélység oka nagy valószínűséggel a Moho-szintjén jelentkező sűrűségugrás. Egész Kárpát-Pannon régió Bouguer-anomália térképének egy jellemző mélységtartománya ez, ami a Pannon-medence Moho-szintjére — legalábbis jelen tudásunk szerint — nem jellemző, viszont a környező hegyek izosztatikus gyökérszónájának jelenléte miatt egy domináns jelfrekvenciával megjelenő mélység. Mivel spektrálanalízissel Kárpát-Pannon régió Bouguer-anomália térképének egészét vizsgáltuk nem lehet a hatásokat területileg lehatárolni, csak a földtani ismereteink alapján utólag értelmezni és magyarázni.

A Conrad-diszkontinuitás (SiAl-SiMa határ) mélységére csak a magyarországi mágneses mérésekből tudtunk következtetni, amiből 15–18 km körüli mélységet feltételeztünk korábbi cikkeinkben (Kiss 2009a, Kiss et al. 2011). Ez a mélység megfelel a gravitációs spektrális mélység-meghatározás 18 km-es mélységének.

Közismert, hogy Magyarországon a legnagyobb medencemélység 7–8 km körüli, tehát a 6,5 km-es mélység a legmélyebb medencéink szintjén jelentkező sűrűségváltozással lehet kapcsolatban.

A gyakorlati gravitációs modellezések és a sűrűség-mélység összefüggések (SZABÓ, PÁNCICS 1999a, MÉSZÁROS, ZILAHÍ-SEBESS 2001) azt mutatják, hogy az üledékek konszolidációjából, a pórustér fogat drasztikus csökkenéséből származó gyors sűrűségnövekedés miatt, általánosan 2–3 km mélységben a laza üledékek a medencealjzatnak megfelelő sűrűséget érnek el, ami után az aljzattól való elkülönítés „a priori” ismeretek hiányában nagyon nehéz. Ez lehetne az utolsó spektrális mélység magyarázata.

A sűrűség változása a felszíntől a legnagyobb behatolási mélységig folyamatos, de vannak olyan vezérszintek (reológiai változásokhoz, hőmérséklet-nyomás hatására létrejött, fázisátalakulásokhoz köthető határfelületek), amelyek domináns hatása megjelenik a spektrumon. A kristályos medencealjzat, a Conrad-, és a Moho-határfelületek is ilyen kitüntetett szintek, ezért is kapcsoltuk a kapott mélységeket ezekhez felületekhez. Nem lehettünk azonban teljesen biztosak abban, hogy csak ezeknél a felületeknél kapunk ugrásszerű változásokat a sűrűségparaméterekben.

Az 52 km-es mélység az Alpok–Kárpátok–Dinaridák esetében a Moho-szint mélységével kapcsolatos, de a Pannon-medencében már a litoszféra vastagságához közeli érték. Erre a xenolitok vizsgálataiból (KOVÁCS et al. 2011) kimutatott kettős felsőköpenyréteg — 30–40 km és egy 40–60 km mély — alapján következtethetünk. KOVÁCS I. és munkatársai egy olyan fosszilis litoszféra–asztenoszféra határt feltételeznek, amely a késő-miocénre jellemző kisebb vastagságú litoszférához tartozott. Erről a mélységtartományról azonban nagyon kevés megbízható információval rendelkezünk. Ez a kettős felsőköpenyszint megmagyarázhatja a magyarországi Moho-szint kijelölések bizonytalanságát is.

Megjegyzendő, hogy a spektrális mélység-meghatározás statisztikusan becsült mélységeket jelent, a spektrum



egyes szakaszai a feltételezett gravitációs hatókat egy változó sűrűségű, vékony ekvivalens réteg vagy egy féltér segítségével írják le, és annak mélységét határozzák meg. Így pontos mélységekről (az interferencia jelenségek és a szuperpozíció elvét is figyelembe véve) nem beszélhetünk, inkább csak mélységtartományokról.

A kimutatott mélységtartományokhoz tartozó anomáliákat a spektrum alapján megtervezett sávszűrőkkel el tudjuk különíteni a Bouguer-anomália térképéből. A szűrt térképek alapján az adott mélységhez tartozó főbb változások (földtani, szerkezeti) beazonosíthatók.

### Gravitációs lineamensek a térképeken

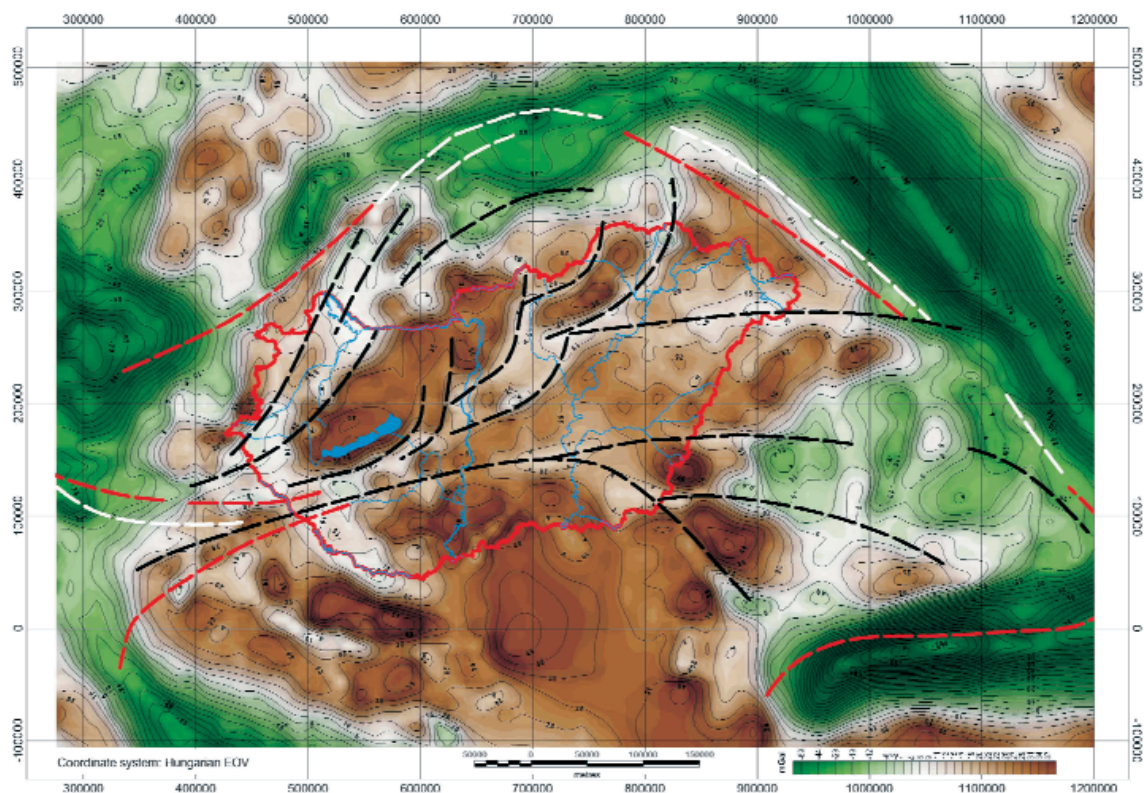
A 8 km rácstávolságú Bouguer-anomália térképen több „keskeny” gravitációs minimumzónát (nevezük lineamensnek) azonosíthatunk (6. ábra), amelyeket nem lehet egy az egyben az ismert üledékes medencék (KILÉNYI, ŠEFARA 1991, JORDÁN 2004, HAAS et al. 2010) hatásával megmagyarázni, illetve a fúrásokból ismert medencealjzat-mélységgel leírni. Ezek a hatások medencealjzatnál mélyebb (kéreg vagy köpeny eredetű) hatások lehetnek, amelyek kialakulásáról csak a gravitáció alapján nehéz lenne bármit is mondani.

A gravitáció az összes, különböző földtani korokban lejátszódó kéregmozgás együttes hatását mutatja, a képződmények sűrűségparamétere alapján összegezve, a szuperpozíció elvének megfelelően.

A lineamensek a legnagyobb hullámhosszúságú anomáliák esetében is azonosíthatóak (KISS 2013b), ami megerősíti a mélybeli eredetet. A minimumzónákban a kéreg átlagos sűrűsége lecsökken a környezetéhez képest, például azért, mert ezek a zónák mély nyírási zónák (a mozgással párhuzamosan kialakuló tektonikai zónák), ahol a mozgások (vagy valamilyen utóhatás) következtében a kéreg kőzetanyaga fellazul, felaprózódik, illetve átalakul. A zónákat vonallal jelöljük ki, de valójában ezek nem vonalszerű képződmények, hanem több kilométer széles zónák.

VAUCHEZ et al. (2012) így írják le a vetőkkel kapcsolatos szerkezetgeológiai és geofizikai tapasztalataikat:

„More than 40 years of structural geology and geophysics have shown that faults are complex structures (cf. review in HANDY et al., 2007). They penetrate deep into the crust and, when crossing the brittle–ductile transition, are no longer characterized by a discontinuity, but by a localized zone of continuous deformation dominated by simple shear, in which the differential displacement between two blocks is accommodated. They become shear zones.”



**6. ábra.** Kárpát-Pannon régió Bouguer-anomália térképe a tölcsérszerű lineamensekkel (minimum zónákkal), (gravitációs lineamens fekete, néhány domborzati lineamens fehér és a földrengészónák, illetve peremvonalai piros színnel jelölve)

**Figure 6.** Cone form gravity lineaments (minimum zones) on the Bouguer anomaly map of Carpathian-Pannonian Region (minimum zone axes are indicated by black dashed lines, topographic lineaments by white dashed lines, and axis or border lines of highly seismic areas by red dashed lines)

Következésképpen a felszínről ismert vetőminta térkép elemei részben mély nyírási zónáknak a különböző felszíni megjelenési formái lehetnek, melyek között térbeli, időbeli, sőt iránybeli eltérések is vannak.

A gravitációs minimumzónák alapján behúzott lineamensek első ránézésre legyezőszerűen szétnyíló, vagy tölcsészerű rajzolatot mutatnak (6. ábra), amelynek a legyezőszára Szlovénia területén van, míg a legyező nyitott része maga a Pannon-medence.

A lineamensek értelmezésünk szerint a mozgással párhuzamosan jelentkező nyírási zónák. A mozgás tengelyiránya esetünkben a NyDNY–KÉK-i irány, Magyarország fő tektonikai iránya. A gravitációs lineamensek ettől a főiránytól É-ra az óramutató járásával ellentétes, ettől D-re pedig, az óramutató járásának megfelelő irányú elfordulást mutatnak, például azért, mert a közettömegek, elérve a TESZ (*Trans European Suture Zone*) vonalát, egy masszív kontinentális tábla szélét — megtorpanva, egyrészt oldalirányú mozgásra kényszerülnek, másrészt harmonika-szerűen felgyűrődnek.

A lineamensek alkotta kép már ismerős számunkra, hiszen az évtizedek óta folyó paleomágnese vizsgálatok (MÁRTON et al. 2009) is azt mutatják, hogy a kréta időszak utáni különböző rotációjú mozgások közötti választóvonal, mint fő tektonikai zóna kettészeli a Pannon-medencét, az É-i ALCAPA- és a déli Tisia (Tiszai)-egységekre (7. ábra). A



7. ábra. Az ALCAPA- és Tisia (Tiszai)-egység paleomágnese rotációja (MÁRTON 2009)

Figure 7. Different rotation of Alcapa and Tisia units based on paleomagnetic measurements (MÁRTON 2009)

lineamensek elfordulása ugyanezzel a haladó-forgómozgással lehet összefüggésben.

## Geodinamika

„A GPS technika terjedésével az 1980-as évek végére szükségessé vált a Nemzetközi Földi Vonatkoztatási Rendszer (ITRS) mellett egy európai, térbeli háromdimenziós geodéziai célú vonatkoztatási rendszer (ETRS) definiálása is, ahol a koordináták időbeli változatlansága volt a cél.

Mindez azzal indokolható, hogy a földi pontok koordinátái a lemeztektonikai mozgások miatt folyamatosan változnak. Ez az európai kontinensen az eurázsiai közlemez mozgása miatt hozzávetőlegesen 2,5 cm/év elmozdulást és koordinátaváltozást jelent” (BORZA et al. 2007).

A modern GPS vizsgálatok alapján tehát egész Európa 2,5 cm/év sebességgel mozog ÉK-i irányban. Ez a sebesség 1 millió év alatt 25 km-es, 10 millió év alatt 250 km-es elmozdulást jelent, ami eléggé meggyőző érv a lemeztektonika és egy olyan mélybeli áramlás mellett, ami az egész merev Eurázsiai kontinentális táblát mozgatja.

Természetesen Európa területén belül a mikrolemezeknek további, az előbbtől eltérő mozgásai is vannak. Az Adriai-mikrolemez (Afrikai-lemez része), D-en 4 mm/év sebességgel mozog északias irányban, míg É-on ez a sebesség csak 2,5 mm/év. Ennek a mozgásnak az energiáját az Alpok előtere 70 km-en belül emészt fel, ÉK-en, a Pannon-medencében viszont 200–300 km sem elegendő a mozgás felemésztésére. A Pannon-medence belsejében, napjainkban Ny-on 1,2 mm/év sebességű ÉK-i irányú mozgás határozható meg, míg K-en érdemben nem mutatható ki mozgás (VÖLGYESI 2010). A földtörténet során azonban mindez másképpen lehetett, amire pl. a lineamensek (mély nyírási zónák), vagy földtani adatok utalhatnak. Az orogén hatások (feszültségterek) által keltett mozgások időben és térben is változnak, amiről közvetett bizonyítékaink vannak.

A Kárpát-Pannon régió kialakulásának áttekintésére felhasználjuk TARI (2012) előadásának néhány geodinamikai vázlatát (8. ábra). A legfőbb szerkezeti elem az ősi Periadriai-vonal, ami körülbelül az Adriai-tenger partvonalá mentén húzódott az oligocénben. Ez a vonal tört meg ÉK-i nyomóerő hatására, miközben a vonal mentén a lemez feldarabolódott és a mikrolemezek egy része ÉK-i irányban mozgott, haladó és forgó mozgással. Ennek a mozgásnak az eredménye a Pannon-medence és az azt övező hegycsoport. Elvileg ennek a mozgásnak a nyomait látjuk megjelenni a gravitációs anomália térképen.

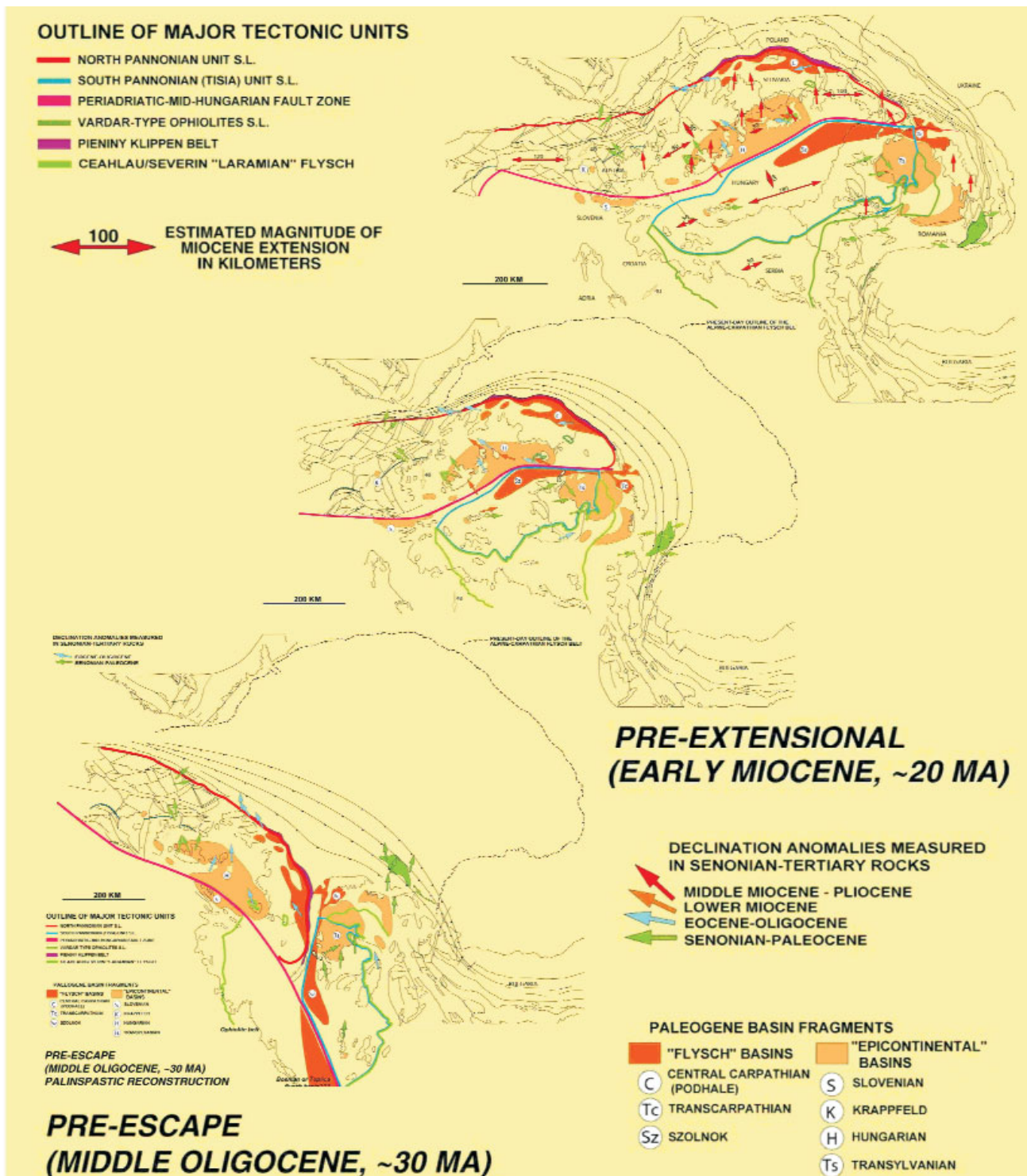
## Egy lehetséges mozgási modell

A gravitációs adatok értelmezésére kialakítottunk egy mozgási modellt, amit hat vagy hét fázisra bontottunk (9. ábra). Ez nem azt jelenti, hogy a fázisokat adott földtani korhoz kapcsoljuk, inkább csak a mozgásnak kisebb lépésekre való lebontását (egységnyi haladó és forgó mozgás) a könnyebb megértés céljából, valamint a kialakuló gravitációs Bouguer-anomália kép kialakulásának megértése céljából.

A modellnél alapvetően két blokk (ALCAPA, Tisia) mozgására koncentráltunk. Mindez valószínűleg a valóság durva leegyszerűsítése (nemcsak két blokk van, a blokkok nem „egységnyi” mozgásokat végeztek), de a folyamatok megértéséhez az egyszerűből kell kiindulni.

**Első fázis:** A kiindulási frontvonal, ami kb. a Periadriai- és Sava-Vardar-zónát összekötő közel egyenes vonalnak felel meg. Ha az egész vonal mentén egyenletes nyomóerő





8. ábra. Geodinamikai vázlatok a Kárpát-Pannon régióról fordított időrendben (TARI 2012)

Figure 8. Geodynamic schemes of Carpathian-Pannonian Region in a reverse chronological order (TARI 2012)

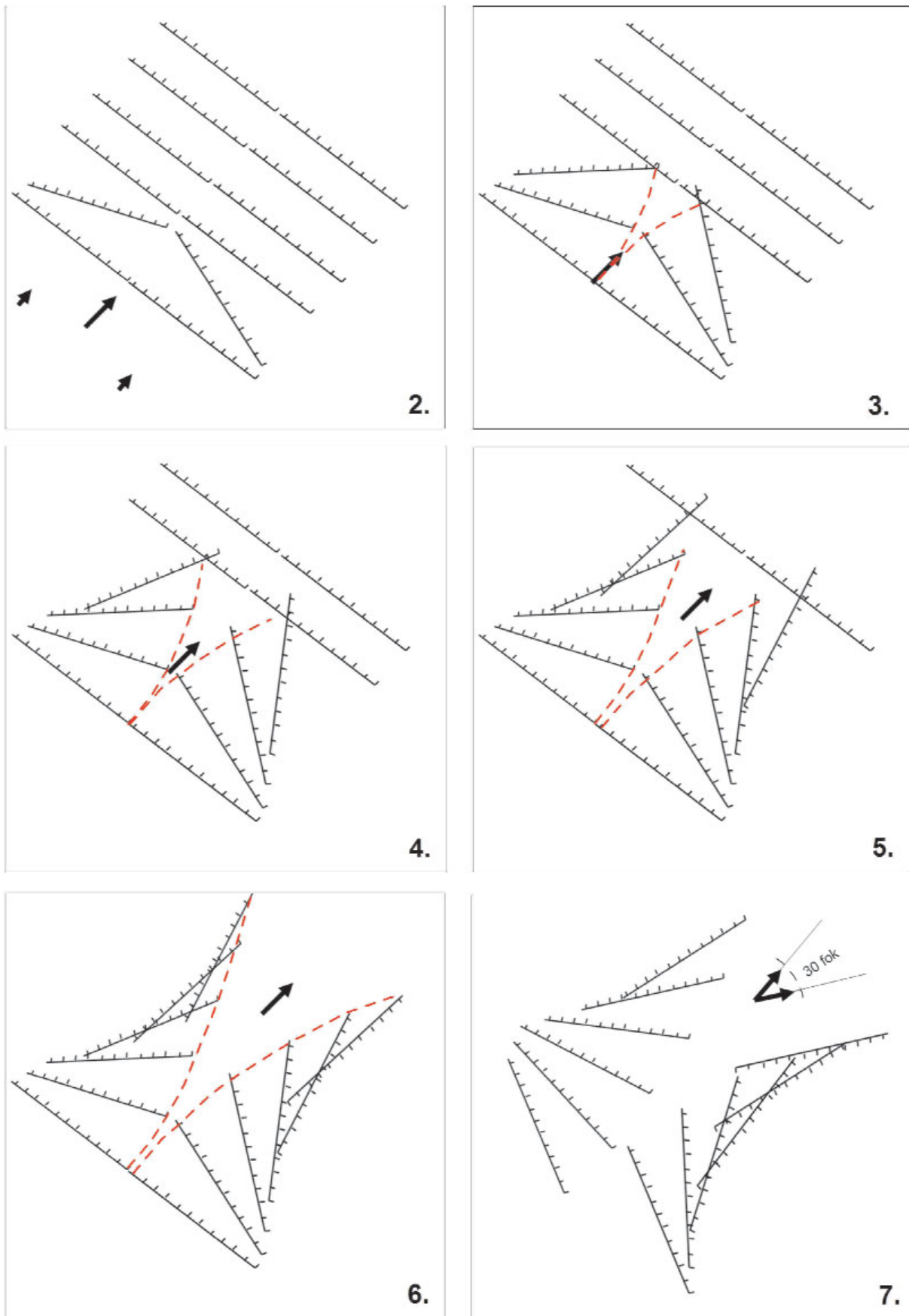
hatna, akkor a párhuzamosan elhelyezkedő vonalak alakulnának ki a különböző időfázisokban.

A nyomóerő azonban a legkisebb ellenállás helyére koncentrálódik (stabil és mobil kéregszakaszok miatt), amit a nagy nyíl helyzete mutat, a vonal mentén távolodva ettől a ponttól, a hatás egyre kisebb.

*Második fázis:* A nyomóerő intenzitása a támadási ponttól

E-ra és D-re is jelen van, de kisebb, ezért a mikrolemezek haladó és forgó mozgása jön létre. A kialakult rotáció a rajzon 20 fokban. A pontszerűen fókuszálódó nyomóerő eltérő sebességű mozgást és az összefüggő Periadriai–Sáva–Vardar-zóna megnyúlását, majd törését jelenti a frontvonal mentén. A haladó mozgás sebessége a támadási ponttól távolodva (ÉNy és DK irányban) a forgás miatt fokozatosan csökken.





9. ábra. Az ALCAPA és Tisia feltételezhető mozgása (modell, Kiss 2013b)

Figure 9. The supposed motions of ALCAPA and Tisia microplates (schematic model, Kiss 2013b)

**Harmadik fázis:** KÉK-i irányú mozgás, 20 fokos rotáció. A frontvonalak további sodródása és forgása következtében három típusterület alakul ki. Az északi blokk az óramutató járásával ellentétes (CCW) rotációval (É-Pannóniai-mikrolemez), a déli blokk az óra járásának megfelelő (CW) rotációval (D-Pannóniai-mikrolemez) és ebben a fázisban már látszik a kinyílás következtében kialakuló tölcésrszerű szerkezet (gravitációs lineamentsrajzolat kezd kialakulni), azaz a középső, harmadik blokk (Közép-Pannóniai-mikrolemez, BALLA 1982, 1984);

**Negyedik fázis:** További KÉK-i irányú mozgás, 20 fokos rotáció. A mozgás és a kinyílás folytatódik, a blokkok távolodnak

**Ötödik fázis:** További KÉK-i irányú mozgás, 20 fokos rotáció. A mozgás és a kinyílás folytatódik. Ez a fázis jelentheti a mozgás végét, vagy a következő, hatodik fázis is bekövetkezik;

**Hatodik fázis:** KÉK-i irányú mozgás, 20 fokos rotáció. A tölcésrszerű szerkezet gyakorlatilag kialakult, a mikrolemezek helyzete merőleges az eredeti helyzetéhez képest a mobil zóna mentén — azzal elválasztva. (Ez a hatodik fázis azonban már túlforgást jelenthet az ismert paleomágneses rotációkhoz viszonyítva, azaz a mozgás lehet, hogy az ötödik fázisnál befejeződött);

A tölcésrszerű rajzolat kialakulását gyorsítja a stabil Kelet-Európai-tábla, ami nem deformálódott, nem roppant meg, hanem ellenhatásával oldalirányú (ÉNy-i és DK-i) mozgásra kényszeríti a korábban ÉK irányú áramlást, s így szintén egyfajta tölcésrszerű kinyílást eredményez.

**Hetedik fázis:** Az ilyen módon létrejött fázisokat megterheljük egy saját tengely körüli 30 fokos CW rotációval, akkor az ÉNy- és DK-Kárpátoknak megfelelő gerincvonal és szerkezeti irányítottaság alakul ki (a K-i résznek, a TESZ hatásának figyelembevétele nélkül). Az északi blokk frontvonalának helyzete a Bécsi-medence irányának felel meg, a déli blokk frontvonala a Déli-Kárpátok Ny–K-i irányát adja meg. Ez a forgás történetelt folyamat, 5 fokos CW forgást feltételezve fázisonként, ami eredményében ekvivalens az egyszerű 30 fokos rotációval. Ez a forgási fázis megmagyarázható egy NyÉNy–KDK irányú olyan köpenyáramlással is, amit a Kárpátok izosztatikus gyökérvonala, illetve a TESZ vonala a Pannon-medence alatt ÉNy–DK-i irányúra, „Vrancea-zóna irányú”-ra változtat.

A mozgásmodell megmagyarázza:

- a gravitációs tölcésrformát (Közép-magyarországi-zóna),
- az északi blokk (ALCAPA) CCW rotációját;
- a déli blokk (Tisia) nagyobb CW rotációját;
- a Kárpátok ívének sajátos formáját;
- a magyarországi tektonika egy részét.

Persze ez csak egy nagy blokkokban felvázolt modell, minimális földtani információ felhasználásával. A valóság ennél sokkal bonyolultabb: több kisebb blokk, bonyolult, időnként inverz mozgásokkal tarkított modellje — aminek csak töredékét ismerjük. Mégis talán érdemes egy ilyen egyszerű modellből kiindulva keresni a megoldást. Tulajdonképpen ennek az útkeresésnek az egyik geofizikai térké-

pezési adatokra alapozott lépését jelentheti ez a modell.

Az archív paleomágneses adatok (pl. MÁRTON et al. 2009) utalnak az ALCAPA- és a Tisia-mikrolemez rotációjára, az átlagos rotáció jellemezheti a mikrolemezeket, nem elfelejtve, hogy a mikrolemez is több részre osztható (CSONTOS, VÖRÖS 2004). Nem zárható ki az sem, hogy a Tisia haladó mozgása nagyon elenyésző volt az ALCAPA mozgásához képest (ALCAPA az Afrikai-, Tisia az Eurázsiai-lemezhez tartozik).

TÓTH, ZSÍROS (2000) által publikált földrengésadatok jelezhetik az aktív lemezhatárokat. A földrengések az aktív lemez szélére koncentrálódnak. Így a földrengések számának gyakorisága egy adott területen lemezhatárookra utalhat. Magyarország területén eddig nehéz volt kapcsolatba hozni a földrengéseket a tektonikai vonalakkal, vagy a földkéreg fizikai paramétereivel. Talán a hiba abban van, hogy nem megfelelő léptékben vizsgáltunk. A magyarországi rengések elhelyezkedése talán szintén az ősi lemezperemekhez kötődik (KISS 2012), illetve azok BENIOFF-zónáihoz, ami néhány 100 km-re is lehet a szubdukciós/kollíziós lemezhatároktól.

E mozgásmodell felállítása során nem foglalkoztunk a Kárpát–Pannon régió tágabb környezetének mozgásviszonyaival. (Ez egy hiányosság, de az ilyen irányú tájékozódás hosszú időre visszavethette volna az eredmények publikálását.) A mozgást előidéző hatások az Adriai-lemez északias mozgása, az Európai-tábla visszatartó ereje és valószínűleg a Moesia-tábla mozgása is besegített az ALCAPA- és a Tisia (Tiszai)-egységek rotációjába. A környező táblák és a Pannon-szegmens (ALCAPA+Tisia) egymáshoz viszonyított mozgásának tisztázása tovább pontosíthatja a modellt.

## **A környező hegykoszorú kialakulása**

Ezek a gravitációs feldolgozásból nyert információk, és a mozgásmodell segíthet a környező hegykoszorú kialakulásának megértésében is. A hegyek az Eurázsiai-tábla és az Afrikai-tábla szubdukciója/kollíziója során keletkeztek. Ezzel kapcsolatban kérdés, hogy melyik tábla szubdukálódik, illetve hogy meddig szubdukció és honnantól kollízió a folyamat?

USTASZEWSKI et al. (2008) szerint az Adriai-tábla szubdukálódott az Európai-tábla alá a Kelet-Alpokban. ARTEMIEVA, MEISSNER (2013) szeizmikus szelvényekre hivatkozva ugyanezt állapítja meg, miközben a Nyugati-Alpok esetében ugyan csak szeizmikus szelvények alapján az Európai-tábla szubdukcióját valószínűsíti.

BRÜCKL et al. (2006), és BEHM et al. (2007) litoszférakutató szeizmikus adatok alapján jelzik az osztrák-magyar-szlóven határ alatti litoszférafelépítés és a Keleti-Alpok kéregszerkezeti felépítésének bonyolultságát. Ezek alapján úgy tűnik, hogy a Keleti-Alpok területén az Adriai-tábla szubdukálódik.

A szeizmikus tomográfia alapján az Adriai- és az Európai-tábla is a Pannon-szegmens alá bukik, de a kettő viszonya egymáshoz képest már nem látszik a mérési anyagon.



Az eltérő nézetek felszámolására a lemeztektonika alap-téziseit kell felhoznunk, amely szerint csak az óceáni lemez tud szubdukálódni (a kontinentális lemez alá), a kontinentális lemez csak a kollízióra (azonos szintbeli ütközésre) képes egy másik kontinentális lemezzel.

BÁLDI (1978) szerint a szubdukálódó (pl. Pennini) óceáni tábla felemésződésével kezdetét veszi a kollízió. Az óceáni tábla alábukásával, a mozgásból adódó feszültségeket levezeti, de az egymásnak ütköző kontinentális táblák esetében, mivel ridegek, könnyűek és vastagok, ez a lehetőség már nem áll fenn, így a kollízió miatt heves orogén mozgások (hegységképződés) kezdődnek.

A vizsgálatok szempontjából az Alpok és a Kárpátok kialakulásának ideje is fontos. Az alpi orogén fázis által létrehozott hegyvonulat Ny-ról K-felé haladva alakult ki és még a mai napig aktív ez az adriai mozgás, amit a GPS mérések is igazolnak (GRENERCZY 2005).

Az Alpok kiemelkedése KUHLEMANN (2007) szerint közel 30 millió évvel ezelőtt az oligocénben kezdődött a hegység Ny-i részén. A K-i rész 20–30 millió év között emelkedett ki. A Kárpátok később kb. 20 millió éve kezdett el kiemelkedni, és noha az emelkedés intenzitása változik, az emelkedés még ma sem állt meg. A Pannon-medence kb. 10 millió éve záródott be és ekkor alakult ki a Pannon-beltenger. Az Alpokban az utolsó 5 millió évben az üledékképződés menete, a termikus fejlődés és tektonika együttes vizsgálata alapján igen erőteljes emelkedési ciklus azonosítható (KUHLEMANN 2007), ami egy újabb hegységképződési fázist jelenthet.

### Köpenyáramlást terelő gyökérvonal

A különböző földtani hatások (elsősorban függőleges irányúak) megjelenítése az időskálán (THATCHER, POLLITZ 2008) nagyon tanulságos, látszik, hogy:

- a szeizmikus rengéshullámok terjedése a leggyorsabb, ideje órák, percek ( $10^{-4}$  év);
- szeizmikus rengések utáni relaxáció (átrendeződés) ideje néhány év ( $10^0$ – $10^1$  év);
- a glaciális izosztikus hatások kiegyenlítődési folyamata néhány ezer év ( $10^3$ – $10^4$  év);
- a litoszféra izosztikus kiegyenlítődése néhány millió – tíz millió évben mérhető ( $10^6$ – $10^7$  év).

Ezek az adatok azért érdekesek, mert az Alpok, Kárpátok kialakulásában is 10 millió éves időintervallumok különíthetők el. Körülbelül 10 millió év kellett az Alpok kialakulásához, majd további 10 millió év a Kárpátok kialakulásához is és 10 millió év kell az izosztikus gyökérvonal kialakulásához is. Az is látszik, hogy az alpi orogén által létrehozott hegylánc Ny-ról K-felé haladva alakult ki. Felvetődik a kérdés, hogy nincs-e kapcsolat a K-i irányú fiatalodás és az izosztikus gyökérvonal kialakulása között?

Egy képzeletbeli mozgásmodell (KISS 2013b) segítségével modellezhetjük a történetet:

- Adriai-tábla É-i irányban mozog;

— Az óceáni kéreg felemésződik és a szubdukció megszűnik, először Ny-on;

— A kollízió (kontinentális táblák ütközése) miatt heves orogén mozgások alakulnak ki;

— Ny-on elkezdődik az Alpok kialakulása (30 M év);

— Az Alpok emelkedése miatt kialakulnak az izosztikus gyökérvonalak;

— A köpenybe nyomuló rideg, merev izosztikus gyökérvonal útját állja a köpenyáramlásnak;

— Az adriai É-i köpenyáramlásból ÉK-i (s valószínűleg ÉNy-i is, de ezzel nem foglalkozunk) áramlás alakul ki a gyökérvonal terelő hatása miatt;

— Az Alpok kialakulása után elkezdődik a Kárpátok felgyűrődése is (20 M év);

— A mozgás olyan heves, hogy az Alpi orogén egységes vonulata kettészakad, Alpok és Kárpátok elkülönül;

— A Kárpátok alatt is kifejlődnek a gyökérvonalak, először Ny-on, majd K-en is, követve a hegységképződést.

— A köpenyáramlás az Alpok–Kárpátok ívét követve a kezdeti É-i után ÉK-i, majd K-i és végül DK-i irányú lesz;

— A hegységív bezáródása miatt az áramlás egy része mélyre bukik (Vrancea-zóna);

— Mivel a vékony Pannon-litoszféra reológiai szempontból messze nem olyan erős, mint az európai kéreg, ezért nincs arra lehetőség, hogy az áramlás tartósan kipréselődjön, ezért a kéreg inkább deformálódik, illetve összenyomódik (VÖLGYESI 2010), lásd süllyedő és emelkedő mozgások a Pannon-medence területén (HORVÁTH 2004).

Érdekes megvizsgálni, hogy a részben geofizikai mérési adatok értelmezésén alapuló elképzelésünk mennyire jelenik meg más szerzők korábban publikált tanulmányaiban. Az egyik ilyen MANTOVANI et al. (2002) tanulmánya, ahol a térképi vázlatok segítségével (10. ábra) vizsgálták az alpi orogén hatását Európa földközi-tengeri zónájában. A térképvázlatokat értelmezve a Kárpát–Pannon régióra a következő állapíthatók meg:

— Az oligocénben a köpenyáramlás fő mozgásiránya északias volt, az Alpok–Kárpátok íve még egységes;

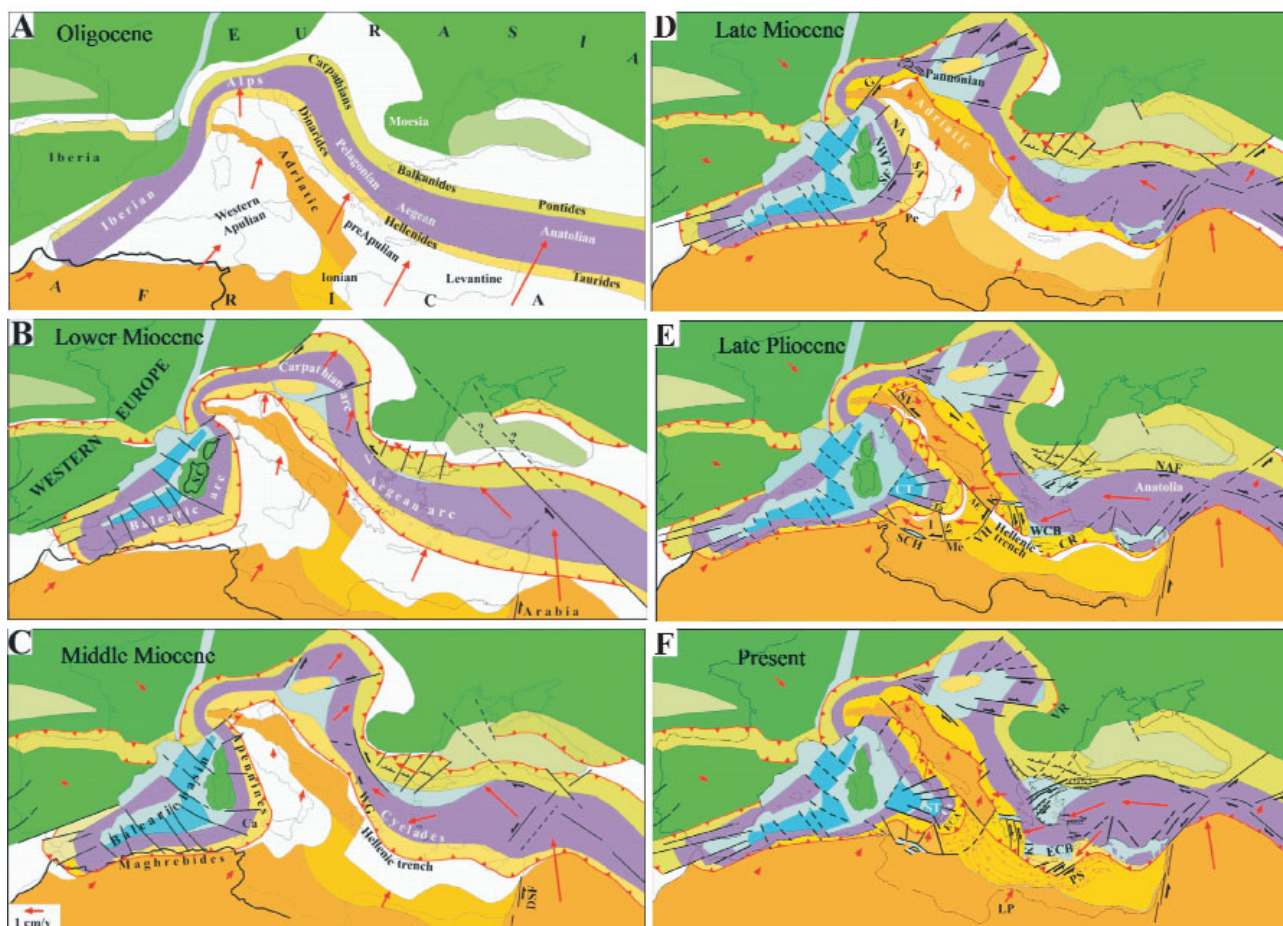
— Kora-miocénben megtörténik a szakadás, K-Alpok és Ny-Kárpátok szétválík, a mozgás iránya északkeletre változik a Pannon-medence É-i részén, míg D-en továbbra is az északi irány dominál;

— Középső-miocénben a mozgás iránya a medence területén egységesen északkeleti irányú;

— Késő-miocénben az Alpok hatása egyre dominánsabb a gyökérvonal már jelentős terelő hatással bírnak, a mozgás iránya keletiesé válik;

Késő-pliocénben a mozgás iránya a Nyugat-Kárpátok gyökérvonalja miatt már délkeleti irányú (Vrancea-zóna felé mutat), mert a Bohémiai-tábla és a Kelet-Európai-tábla stabilitása miatt a feszültségek csak délkeleti irányban a mozgó, még képlékeny alpi orogén zónában tudnak kompenzálódni.

MANTOVANI et al. (2002) megállapításai semmiben nem mondanak ellent a mi megállapításainknak, hanem inkább igazolják (pontosabban már jóval korábban felvázolták) a feltételezéseinkkel összefüggő mozgásmodellt.



10. ábra. Az alpi orogén hatása Európa földközi-tengeri zónájában, A) oligocén, B) kora-miocén, C) középső-miocén, D) késő-miocén, E) késő-pliocén, F) napjainkban (MANTOVANI et al. 2002)

Figure 10. The Alpine orogenic effects in the zone of the Mediterranean Sea, A) Oligocene, B) Lower Miocene, C) Middle Miocene, D) Late Miocene, E) Late Pliocene, F) at present (MANTOVANI et al. 2002)

AE = Apulian escarpment, Ca = Calabria, CR = Crete-Rhodes, DSF = Dead Sea Fault, ECA = External Calabrian Arc, ECB = Eastern Cretan basin, G = Giudicarie trans-pressureional fault system, K = Kefallinia fault, KI = Kithira trough, LP = Lybian promontory, Me = Medina fault, NA = Northern Apennines, NAF = North Anatolian fault system, NWT = Northwestern Tyrrhenian, Pe = Pelagian zone, PS = Pliny and Strabo trenches, SA = Southern Apennines, SC = Sardinia-Corsica block, SCH = Sicily channel fault system, SE = Siracusa escarpment, SF = Selli fault, SV = Schio-Vicenza Line, Ta = Taormina fault zone, V = Vardar zone, WCB = Western Cretan basin, WG = Western Greece, VH = Victor-Hensen fault

### Következtetések

A Kárpát–Pannon régió regionális gravitációs hatásainak vizsgálata során jelentős izosztáziából származó negatív anomáliákat azonosítottunk a Pannon-medencét körülölelő hegykoszorú vonalában. A Pannon-medence belsejét, ami ebből adódóan egy gravitációs maximum, tovább elemeztük. A maximumon kirajzolódó tölcserzerű rajzolatot alkotó gravitációs minimumzónák eredetét a nagy sűrűségű medencealjzat felszínének helyzetével, lefutásával nem lehetett megmagyarázni, tehát a medencealjzatnál mélyebben elhelyezkedő hatók kerültek a vizsgálódás fókuszába s azokon keresztül az egész Pannon-medence kialakulása és geodinamikai modellje.

A szubdukálódó óceáni kéreg felemésztődése után a kontinentális lemezek ütközésekor a kollízió hatására heves orogén mozgások (hegységképződés) kezdődtek.

Az Alpok–Kárpátok kialakulása az Afrikai és az Eurázsiai-lemez kollíziójának köszönhető. Az Adriai-mikro-lemez északias mozgását okozó köpenyáramlás irányát az Alpok alatt (az izosztázia miatt) kialakuló, köpenybe nyúló gyökérzónák módosították (ez az izosztatikus kiegyenlítődség a hegységképződést követő tízmillió év alatt következett be). Az először ÉK-i majd K–DK-i köpenyáramlás az Alpok után létrehozta a Kárpátok ívét, illetve a hegységképződés néhány millió éves fáziskéséssel megalkotja az egyensúlyra való törekvés miatt az áramlást elterelő saját izosztatikus gyökérzónáját is.

Létrejön a „kollízió – hegységképződés – izosztatikus gyökérképződés – köpenyáramlás módosulása” ciklus, amely az egész alpi–kárpáti hegyláncolatot létrehozhatta az Európai- és Afrikai-tábla határfelületén.

A gravitációs minimumzónák, mint a kéreg- vagy köpenymozgásokkal párhuzamosan kialakuló mély nyírási zónák vannak jelen, ami az eltérő összetételű, korú és ki-



fejlődésű kéregblokkok között egyfajta átmenetet képez. Tehát geodinamikai mozgások nyomait véljük felfedezni a Kárpát–Pannon régió Bouguer-anomália térképén, ezt mutatta be a tanulmány.

### Köszönetnyilvánítás

SZARKA Lászlónak, aki felvetette a régió gravitációs értelmezésének még kiaknázatlan lehetőségeit. BALLA

Zoltánnak, akinek a témakörben végzett földtani és geofizikai adatokat feldolgozó munkássága a folyamatok megértése szempontjából nagyon fontos volt. HORVÁTH Ferencnek, aki a Kárpát–Pannon régió kialakulásának „mobilitista” elképzeléseit összegyűjtötte és közzétette cikkeiben, tanulmányaiban és nagy doktori értekezésében. KOVÁCS István Jánosnak, akivel rendszeres szakmai beszélgetéseink a geofizika, geokémia és a geodinamika összefüggéseinek jobb megértéséhez és a jelen cikk megszületéséhez vezettek.

### Irodalom — References

- AIRY, G. B. 1855: On the compensation of the effect of the attraction of mountain measurements. — *Phil. Trans.* London
- ARTEMIEVA, I. M., MEISSNER, R. 2013: Crustal thickness controlled by plate tectonics: A review of crust–mantle interaction processes illustrated by European examples, — *Tectonophysics* 530–531 (2012), pp. 18–49.
- BÁLDI T. 1978: *A történeti földtan alapjai*. — Tankönyvkiadó, Budapest, 307 p.
- BALLA, Z. 1982: Development of the Pannonian Basin basement through the Cretaceous–Cenozoic collision: a new synthesis. — *Tectonophysics* 88, pp. 61–102.
- BALLA, Z. 1984: The Carpathian loop and the Pannonian basin: A kinematic analysis. — *Geophysical Transactions* 30 (4), pp. 313–353.
- BORZA T., KENYERES A., VIRÁG G. 2007: Műholdas geodéziai vonatkoztatási rendszerünk (ETRS89) felújítása, — *Geodézia* 10, pp. 40–48
- BRÜCKL, E., BEHM, M., BLEIBINHAUS, F., GRAD, M., GUTERCH, A., KELLER, G. R., THYBO H., CELEBRATION 2000, ALP2002 Working Groups, 2006: Tectonic interpretation of a 3D seismic model of the Eastern Alps. — EGU poster
- BEHM, M., BRÜCKL, E., MITTERBAUER, U., CELEBRATION 2000, ALP 2002 Working Groups 2007: A New Seismic Model of the Eastern Alps and its Relevance for Geodesy and Geodynamics. — *Vermessung & Geoinformation* 2/2007, pp. 121–133.
- CSONTOS, L., VÖRÖS, A. 2004: Mesozoic plate tectonic reconstruction of the Carpathian region. — *Paleogeography, paleoclimatology, paleoecology* 210, pp. 1–56.
- GRENERCZY, Gy. 2005: Crustal motions from space geodesy: a review from EPN, CEGRN, and HGRN data. — *Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary* 204, pp. 31–34
- HAAS J., BUDAI T., CSONTOS L., FODOR L., KONRÁD Gy. 2010: Magyarország pre-kainozoos földtani térképe, 1:500 000. — A Magyar Állami Földtani Intézet kiadványa, Budapest.
- HANDY, M. R., HIRTH, G., BÜRGMANN, R., 2007: Continental fault structure and rheology from the frictional-to-viscous transition downward. — IN: HANDY M. R., HIRTH G., HOVIUS N. (eds): *Dahlem Workshop Reports*. The MIT Press, Cambridge, USA, pp. 139–181.
- HEISKANEN, W. A., NISKANEN, E., KÁRKI, P. 1959: Topographic-isostatic maps for Europe. — *Publications of Isostatic Institute* 31, Helsinki.
- HORVÁTH F. 2004: A Pannon-medence jelenkori geodinamikájának atlasza, Euro-konform térképsorozat és magyarázó. — [http://geophysics.elte.hu/atlas/geodin\\_atlas.htm](http://geophysics.elte.hu/atlas/geodin_atlas.htm)
- HORVÁTH F. 2007: A Pannon-medence geodinamikája: eszméletörténeti tanulmány és geofizikai szintézis. — MTA doktori értekezés, Budapest, 238 p.
- JORDÁN Gy. 2004: A fürdőfejlesztésekkel kapcsolatban a hazai termálvízkészlet fenntartható hasznosításáról és a használt víz kezeléséről szóló hidrogeológiai kutatás. Országos digitális földtani térmodell, KM-KÉ-2964/2004. X. 1. — *Kézirat*, Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.
- KILÉNYI, É., ŠEFARA, J. 1991: Pre-Tertiary Basement Contour Map of Carpathian Basin Beneath Austria, Czechoslovakia and Hungary. — *Geophysical Transactions* 3 (1–2), pp. 15–36.
- KISS J. 2006: Magyarország gravitációs lineamentstérképe — első eredmények. — *Magyar Geofizika* 47 (2), pp. 1001–1010.
- KISS J. 2009a: Gravitációs és mágneses feldolgozások és modellezések a földtani környezet megismerése céljából. — Doktori (PhD) értekezés, NyME Kitaibel Pál Környezettudományi Doktori Iskola, Sopron, 129 p.
- KISS J. 2009b: Regionális gravitációs anomáliák, izosztikus hatások Magyarországon. — *Magyar Geofizika* 50 (4), pp. 153–171.
- KISS J. 2010: Mély medencék izosztikus hatása. — *Magyar Geofizika* 51 (3), pp. 1–13.
- KISS J. 2012: A Kárpát-Pannon Régió Bouguer-anomália térképének frekvenciatartománybeli vizsgálata és értelmezése. — *Magyar Geofizika* 53 (4), pp. 36–257.
- KISS, J. 2013a: Geodynamic consequences of isostasy in the Carpathian-Pannonian Region (by gravity data processing). — *Journal of the Balkan Geophysical Society* (in press)
- KISS J. 2013b: A Pannon-Kárpát Régió gravitációs képe — geodinamikai vonatkozások. — Előadás, Földtudományi Vándorgyűlés és kiállítás, 2013. július 4–6, Veszprém ([http://www.foldtan.hu/portal\\_engine/shpicsr.php?projekt=PR66&node=3110296&type=dl](http://www.foldtan.hu/portal_engine/shpicsr.php?projekt=PR66&node=3110296&type=dl))
- KISS J., ZILAHÍ SEBESS L., SZARKA L. 2011: A mágnesség jelensége és a Hopkinson-effektus. — *Magyar Geofizika* 52 (3), pp. 151–169.
- KOVÁCS I., FALUS Gy., STUART G., HIDAS K., SZABÓ Cs., FLOWER M., HEGEDŰS E., POSGAY K., ZILAHÍ-SEBESS L., FANCSIK T. 2011: Asztenoszféra áramlás, mint a terciér kilökődés és extenzió hajtóereje? — *Magyar Geofizika* 52 (2), pp. 79–87.
- KUHLEMANN, J. 2007: Paleogeographic and paleotopographic evolution of the Swiss and Eastern Alps since the Oligocene. — *Global and Planetary Change* 58, pp. 224–236.

- MANTOVANI, E., ALBARELLO, D., BABBUCCI, D., TAMBURELLI, C., VITTI, M. 2002: Trench-arc-backarc systems in mediterranean area: Examples of extrusion tectonics. — *Journal of the Virtual Explorer* 8, pp. 125–141.
- MÁRTON, E., RAUCH-WŁODARSKA, M., KREJČÍ, O., TOKARSKI, A. K., BUBÍK, M. 2009: An integrated palaeomagnetic and AMS study of the Tertiary flysch from the Outer Western Carpathians. — *Geophysical Journal International* 177, pp. 925–940. DOI: 10.1111/j.1365-246X-2009.04104.x
- MÉSZÁROS, F., ZILÁHI-SEBESS, L. 2001: Compaction of the sediments with great thickness in the Pannonian Basin. — *Geophysical Transactions* 44 (1), pp. 21–48.
- SZABÓ, Z., PÁNCICS, Z. 1999a: Rock densities in the Pannonian basin — Hungary. — *Geophysical Transactions* 42 (1–2), pp. 5–28.
- SZABÓ Z., PÁNCICS Z. 1999b: Magyarország változó sűrűséggel korrigált Bouguer-anomália térképe. — *Geophysical Transactions* 42 (1–2), pp. 29–40
- TARI, G. 2012: Exploring conjugate margins: Bohemian and Moesian margins of Central Europe. — EAGE Distinguished Lecture, MFGI, Budapest, May 10, 2012
- THATCHER, W., POLLITZ, F. F. 2008: Temporal evolution of continental lithospheric strength in actively deforming regions. — *GSA Today*, 18 (4/5), pp. 4–11. doi: 10.1130/GSAT01804-5A.1
- TÓTH L., ZSÍROS T., 2000: A pannon-medence szeizmitása és földrengéskockázata. — <http://www.sze.hu/ed/TothZsiros.doc>
- USTASZEWSKI, K., SCHMID, S. M., FÜGENSCHUCH, B., TISCHLER, M. 2008: A map-view restoration of the Alpine–Carpathian–Dinaric system for the Early Miocen. — *Swiss J. Geosci.* 101, S273–S294, doi:10.1007/s00015-008-1288-7
- VAUCHEZ, A., TOMMASI, A., MAINPRICE, D. 2012: Faults (shear zones) in the Earth's mantle. — *Tectonophysics* 558–559, pp. 1–27. DOI:10.1016/j.tecto.2012.06.006
- VENING-MEINESZ, F. A. 1948: Gravity expeditions at sea 1923–1938. Vol. IV. Complete results with isostatic reduction, interpretation on the results. — Delft: Nederlandse Commissie voor Geodesie 9, 233 p.
- VÖLGYESI L. 2010: A Kárpát-Pannon-térség geodinamikája. — *Kézirat*, BME <http://www.agt.bme/volgyesi/mszeizmo/pannon.pdf>